

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL CENTRO HISTÓRICO DE TAPACHULA, CHIAPAS, CON EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Alejandro Ruiz Sibaja¹, Francisco Vidal Sánchez² y Carolina Aranda Caballero²

Resumen: Los sismos destructores históricos y recientes han mostrado que el colapso de las edificaciones es el factor que más contribuye a la pérdida de vidas humanas. Un estudio de vulnerabilidad sísmica determina el nivel de seguridad de una zona urbana o de una serie de edificaciones ante los movimientos sísmicos que pueden ocurrir en dicho sitio. Mediante este tipo de estudio se hace un diagnóstico de niveles de desempeño de cada edificación y se evalúa su posible comportamiento y susceptibilidad al daño sísmico. En este trabajo se ha estimado la vulnerabilidad sísmica de 399 edificaciones de 22 manzanas del Centro Histórico de Tapachula, Chiapas, con dos métodos: primero el de clasificación tipológica según la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) y posteriormente mediante el método del índice de vulnerabilidad sísmica (MIV) de *RISK-UE*. Este método es un refinamiento del primero que cuantifica mejor los factores de construcción y comportamiento de cada edificio que modifican su vulnerabilidad. Los resultados obtenidos se presentan en tablas y mapas de vulnerabilidad sísmica y muestran que en la zona estudiada predominan las edificaciones con clases de vulnerabilidad alta (B) y muy alta (A) y que la estimación de la vulnerabilidad aplicando los criterios de la Escala EMS mejoran significativamente al aplicar MIV, que detecta un incremento de construcciones de clase A (de 36 a 44) y una disminución de las de clase E (de 13 a 5) respecto a la evaluación con EMS.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica de edificios, método del índice de vulnerabilidad, Risk-UE, Tapachula, gestión de emergencias sísmicas.

SEISMIC VULNERABILITY STUDY OF HISTORIC DOWNTOWN OF TAPACHULA, CHIAPAS, BY THE VULNERABILITY INDEX METHOD

Abstract: Historical and recent destructive earthquakes have proved that the collapse of buildings is the factor that contributes to lose human lives. A study in seismic vulnerability determines the level of security of urban areas or a series of buildings against earthquakes occurring in such place. Through this sort of studies, a diagnostic of levels of performance is carried out in each building and appraisal of the behavior and susceptibility to seismic damage. In this paper, the seismic vulnerability of 399 buildings in 22 city blocks in the historical downtown of Tapachula have been estimated by two methods: first, the typological classification according to the European Macro Seismic Scale (EMS-98) and later by the Vulnerability Index Method (VIM) of RISK-UE. The latter is a refined method of the first which quantifies the construction factors in a better way and the behavior of every building which modifies their vulnerability. The results obtained are presented in seismic vulnerability tables and maps, and they show that, in the studied area, there are High Vulnerability Class Buildings (B) and Very High Class (A), and the estimate of vulnerability, according to the EMS scale criteria, is improving significantly when applying the VIM which perceives an increase in Class A constructions (from 36 to 44) and a decrease in Class E (from 13 to 5) according to the EMS evaluation.

¹ Cuerpo Académico de Prevención de Desastres Naturales, Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ingeniería, E-mail: asibaja@unach.mx

² Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada (España), E-mail: fvidal@ugr.es, ca.arquitect@gmail.com

Keywords: building seismic vulnerability, vulnerability index method, Risk-UE, Tapachula, earthquake emergency management.

INTRODUCCIÓN

Los daños sísmicos en construcciones dependen fundamentalmente de las características del movimiento sísmico local y de la vulnerabilidad. Los modelos de estimación de pérdidas debido a sacudidas sísmicas para una ciudad son de gran importancia para predecir el impacto en futuros terremotos y también para establecer estrategias de mitigación del riesgo. Una componente esencial en dichos modelos es una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las construcciones existentes.

En el contexto de centros urbanos, el análisis de vulnerabilidad sísmica se centra principalmente en el pronóstico de los daños y la información necesaria está relacionada con: 1) la distribución espacial y las características estructurales de los edificios, ligadas al comportamiento dinámico de éstas, y 2) las condiciones del terreno, que modifican el input sísmico en cada emplazamiento. Los centros históricos de ciudades expuestas a terremotos suelen ser, junto con los barrios marginales, los de mayor riesgo sísmico. Esto se debe a que gran parte de sus edificios tienen una vulnerabilidad sísmica alta por estar contruidos con materiales frágiles, sin diseño sismorresistente, y en muchos casos deteriorados por el envejecimiento o por reformas inadecuadas o bien están pegados a edificaciones de distinta altura y materialidad.

La vulnerabilidad sísmica de un conjunto de edificios es la susceptibilidad a sufrir daños por sacudidas sísmicas (p.e. FEMA, 1999; Hill y Rossetto, 2008) y por tanto cuantifica su capacidad resistente frente a acciones sísmicas. La vulnerabilidad es una característica intrínseca del edificio que depende de sus características de diseño, materiales y construcción. La evaluación de la vulnerabilidad consiste en determinar cuál es el grado de daño esperable en un edificio para cada nivel del movimiento sísmico del terreno.

Hay dos métodos que se utilizan frecuentemente en la estimación de la vulnerabilidad sísmica: 1) Los *empíricos*, que provienen del campo de la sismología, basados en estudios post-terremoto donde los daños a diversas tipos de construcción se correlacionan con el movimiento del suelo estimado o medido. Estos métodos cuantifican la acción mediante un solo parámetro, típicamente la intensidad macrosísmica o la aceleración pico del terreno, PGA, y definen las características resistentes de los elementos expuestos mediante clases o índices de vulnerabilidad (se denominan también *macrosísmicos* o *uniparamétricos*, Lantada, 2007). 2) Los *deterministas* o *analíticos*, que provienen del campo de la vulnerabilidad estructural y de la ingeniería sísmica, donde se calcula el funcionamiento sísmico a través del análisis dinámico de estructuras individuales y de edificios tipo, como hace p.e. HAZUS, un software de estimación de riesgos desarrollado por FEMA (*Federal Emergency Management Agency*). Estos métodos cuantifican la acción mediante espectros de demanda y la resistencia sísmica mediante parámetros con significado físico directo, como p.e. los espectros de capacidad (se denominan también *espectrales* o *multiparamétricos*).

La ciudad de Tapachula de Córdova y Ordóñez (en adelante Tapachula), situada en la costa en el SE de Chiapas y limítrofe con Guatemala, es el mayor centro de población de esta zona, y el motor económico de Chiapas. La ciudad tiene, según el censo de 2010 (INEGI, 2010), una población de 202,602 habitantes, y un crecimiento demográfico alto, cercano al 5% anual. Su peligrosidad sísmica es muy alta; en el mapa de peligrosidad sísmica de América Central estimado por Benito et al. (2012) Tapachula tendría una aceleración máxima (PGA) superior a 0.5 g para un periodo de retorno de 475 años y González et al. (2012) obtuvieron también resultados similares. En la zonificación sísmica de México, reflejada en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-CFE 1993, 2008), la ciudad está dentro la zona D caracterizada con una PGA de 0.7 g para dicho periodo de recurrencia.

Esto se debe a que en el territorio de Chiapas se han reportado grandes sismos históricos (9 de magnitud $M_w \geq 7$ en el siglo XX) y su frecuencia es muy alta (p.e. 16 sismos de magnitud $M_w \geq 5.5$ entre 2001 y 2010). El estado de Chiapas, junto con los de Guerrero y Oaxaca, concentra la mayoría de la actividad sísmica que ocurre en México. Los sismos de Chiapas se originan en cinco fuentes sismogénéticas (Mora *et al.*, 2012). 1) La debida al proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, da origen a sismos de gran magnitud ($M_w > 7.0$) (Suárez y Singh, 1986; Pardo y Suárez, 1995) tal como el del 23 de septiembre de 1902, $M_w = 7.7$ (Figuroa, 1973) o los recientes del 21 de enero de 2002 ($M_w = 6.7$) y 7 de noviembre de 2012 (costa de Guatemala, $M_w = 7.4$). 2) La generada por la deformación interna de la placa subducida, con sismos de profundidad intermedia (de 80 a 300 km),

como p.e. el sismo del 21 de octubre de 1995, $M_w = 7.2$. 3) La originada por la deformación cortical asociada a sistemas de fallas superficiales, con temblores de pequeña profundidad (40 km) Figueroa (1973) y magnitud moderada que producen daños locales, tales como los enjambres de Chiapa de Corzo de julio de octubre de 1975 (Figueroa *et al.*, 1975). 4) La asociada a los volcanes activos como el Complejo Volcánico Tacaná y el volcán El Chichónal. Para Tapachula el volcán Santa María, en Guatemala, representa un peligro importante (como el debido a la erupción del 24 de octubre de 1902. 5) La relacionada con el contacto entre las placas Norteamericana y Caribe, con fallas sinistrorsas (Motagua y Polochic) y sismos muy importantes como el del 18 de abril de 1902, que destruyó parte de Antigua Guatemala y alcanzó intensidad VIII en la zona del Soconusco, Chiapas (Benito *et al.*, 2001).

La acción recurrente de los terremotos en esta ciudad implica un riesgo alto de pérdidas de vidas humanas y de daños a edificaciones e infraestructuras, debido principalmente a las condiciones de vulnerabilidad de la zona y a una práctica constructiva que adolece de la falta de una normativa obligatoria para el cálculo estructural. La mayoría de los proyectos de estructuras que se realizan en Tapachula hacen referencia a normativas (generalmente el reglamento de construcción y las normas técnicas del Distrito Federal) que no tienen en cuenta las condiciones del suelo y de la peligrosidad sísmica locales ni los procesos y técnicas constructivas de esta localidad. Mora et al (2012) y González et al (2012) identificaron ocho tipologías de construcción en el área urbana de Tapachula, siendo las estructuras murarias de ladrillo o de bloques con losa maciza las más abundantes. En el Centro Histórico es donde se presentan una mayor variedad de tipologías y están las edificaciones más antiguas, lo que indica la necesidad y el gran interés de realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica con una muestra lo suficientemente significativa de estas tipologías.

En México se disponen de muy pocas metodologías propias para la estimación de la vulnerabilidad sísmica (p.e. programa CAPRA, Cardona et al., 2010), por lo que generalmente se emplean metodologías tomadas de Europa o los Estados Unidos. Entre los estudios de aplicación podemos citar, entre otros, los de Ataclán, Puebla (Vega y Lermo, 2005), los de Colima (Tejeda et al., 2004; Preciado, 2007; Preciado y Orduña, 2008), varios centros históricos del SE mexicano (Salgado, 2005); de Sultepec, Estado de México (Ramírez de Alba et al., 2007), Acapulco, Guerrero (Sanchez-Tizapa et al., 2013), Tlomulco, Jalisco (Preciado et al., 2015).

En este trabajo se aplican dos métodos empíricos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica: 1) el Método basado en la Escala de Intensidad Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998), que aquí denominaremos *MEMS*, y 2) el Método del Índice de Vulnerabilidad (*MIV*) del proyecto *RISK-UE* (Milutinovic & Trendafiloski, 2003). El *MEMS* es un método simple que asigna clases de vulnerabilidad a los edificios considerando fundamentalmente su tipología constructiva, el material predominante usado en la construcción del sistema resistente y el nivel de diseño. La metodología *MIV* consiste en obtener un índice de vulnerabilidad característico de cada edificio, V_i , en función de la calidad estructural a partir de las clases de vulnerabilidad de la EMS-98, y tener en cuenta factores modificadores como p.e. calidad de la ejecución material, posición, geometría en planta y en altura, etc. lo que ofrece la ventaja de la simplicidad y al mismo tiempo permite considerar numerosas incertidumbres ligadas a cada edificio en concreto.

El presente estudio se basa en una inspección y clasificación detallada de las edificaciones pertenecientes a 22 manzanas del Centro Histórico de Tapachula para evaluar su vulnerabilidad sísmica con los dos métodos mencionados y analizar la distribución de dicha vulnerabilidad.

DATOS

Las 399 edificaciones estudiadas pertenecen a las 22 manzanas del Centro Histórico de Tapachula mostradas en la Figura 1. La zona abarca un área de aproximada de 10 hectáreas. Las edificaciones son de diversas tipologías estructurales, desde murarias de adobe, ladrillo o bloques, hasta estructuras de concreto reforzado y de acero. En la Figura 2 se muestran dos ejemplos de estructuras.

Para recoger de forma organizada, sencilla y relativamente rápida la información estructural relevante y el estado de las edificaciones se confeccionó una ficha técnica. En ella se incluyeron las características principales de los edificios considerando cuatro aspectos:

- *Información general de la edificación:* ubicación, número de plantas y de sótanos, fecha de la construcción, uso, ocupación, instalaciones, etc.

- *Características de los elementos estructurales y no estructurales:* tipo de estructura, sistema de piso, tipo y pendiente del terreno, cimentación, elementos no estructurales, otros elementos, etc.
- *Otros datos relacionados con la vulnerabilidad,* según sean estructuras de mampostería o de concreto reforzado: nivel de código sísmico, número de pisos, irregularidad en planta o en altura, ubicación dentro de la manzana, juntas sísmicas, edad, información sobre el grado de deterioro, etc.
- *Observaciones e información fotográfica:* donde se muestran imágenes con detalles de la estructura y su estado que serían difíciles de describir en el formulario, mostrando, en su caso, la gravedad de los problemas observables y anotaciones correspondientes a otros factores relevantes para la estimación de la vulnerabilidad.



Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Figura 1. Ubicación de las 22 manzanas del Centro Histórico de Tapachula, Chiapas, que comprenden las 399 edificaciones analizadas en este trabajo.



Figura 2. Ejemplos de edificios analizados con estructuras murarias (izquierda) y de pórticos de RC con cerramientos de ladrillo (derecha).

Después de registrar en las fichas técnicas las características de cada una de las 399 edificaciones investigadas *in situ*, estas se agruparon de acuerdo con su uso, ubicación en la manzana (y relación con colindantes) y sus características estructurales: tipo de material de construcción (mampostería de adobe, ladrillo o bloques, concreto reforzado y acero), cimentación y sistema de piso-techo, de modo que fuese más fácil evaluar su vulnerabilidad final con los métodos MEMS y MIV, que pasamos a describir.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

El daño que sufre una edificación durante un terremoto está relacionado con la intensidad del movimiento del terreno (que depende fuertemente de las características del sitio) y con la vulnerabilidad de la construcción (que depende de su tipología, nivel de diseño, calidad de la ejecución material, geometría, posición con colindantes, estado de conservación, etc.).

La tipología constructiva es quizás el factor más importante al estudiar la vulnerabilidad de los edificios, ya que está ligada tanto a la calidad del material con que se realiza la estructura como al modo de construirla (condicionado al diseño y la ejecución de la obra). De ahí que las características resistentes del material y la forma en que se dispone en la estructura en cada región y época son las propiedades que fundamentalmente se han considerado para clasificar las tipologías constructivas.

La diferenciación clara de las tipologías constructivas en función de su comportamiento sísmico es crucial para la evaluación de la vulnerabilidad. Esta diferenciación tipológica ha sido el factor clave para clasificar la vulnerabilidad de las construcciones en las escalas de intensidad como p.e. la Modificada de Mercalli MM-56 (versión Richter, 1958), la escala MSK-1964 (Medvedev et al, 1965) o la EMS-98 (Grüntal, 1998) y también en el método MIV propuesto por el proyecto Risk-UE que definió una matriz de tipologías estructurales características de Europa.

Método de la Escala EMS-98 (MEMS)

La Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) establece seis clases de vulnerabilidad ordenadas de menor a mayor resistencia sísmica (A, B, C, D, E, F), estas clases establecen las características más probables de resistencia ante fuerzas sísmicas (especialmente ante las laterales) de cada tipología constructiva, aunque considera la posibilidad de que diferentes tipos de edificios pueden pertenecer a una misma clase de vulnerabilidad y también que edificios de una tipología pueden presentar respuestas sísmicas diferentes (Barbat y Pujades, 2004) y por tanto vulnerabilidades diferentes.

La escala EMS considera cuatro categorías en función de la construcción de su sistema resistente: Mampostería, Hormigón Armado, Metal y Madera. Dentro de cada categoría considera diversos tipos de edificios caracterizados en función de los materiales empleados en su construcción y de las características de diseño, en total 15 tipos. Cada tipología de edificios admite diversos rangos posibles de pertenencia a clases de vulnerabilidad definidos como: más probable, probable y menos probable o excepcional.

Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV)

La vulnerabilidad de un edificio se puede definir también mediante un índice de vulnerabilidad numérico, como lo hace el MIV desarrollado en el proyecto RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003). Esta metodología cuantifica la acción sísmica en términos de la intensidad macrosísmica y evalúa la resistencia sísmica del edificio en términos de un índice de vulnerabilidad \bar{V}_I . Este índice se encuentra entre 0 y 1, siendo sus valores más altos para los edificios más vulnerables y los más bajos para edificios que resisten sismos fuertes. Es una metodología simplificada, resultado de la combinación del método del índice de vulnerabilidad y de la EMS-98.

El método es robusto y sencillo de aplicar, y permite cuantificar con un alto nivel de detalle la vulnerabilidad de los edificios a partir de la calidad del sistema estructural y de la influencia de otros factores (como el nivel de diseño, la geometría en planta y en altura, la posición con edificios colindantes o el estado de conservación del edificio) que pueden modificar su comportamiento ante el sismo.

El MIV clasifica primero los edificios en tipologías estructurales caracterizadas mediante índices de vulnerabilidad básicos V_I^* o tipológicos. Las características particulares de cada edificación, entre las que se hallan el

número de pisos y el nivel de protección sísmica, se tienen en cuenta mediante modificadores de este índice básico. Cuando un edificio se corresponde con alguno de los tipos definidos en la matriz de estructuras de esta metodología, se le asigna el índice de vulnerabilidad V_I^* correspondiente al valor más probable. Posteriormente a este valor se le suman índices modificadores (regionales ΔM_R y por comportamiento ΔM_{C_i}) para adaptarlo a las características particulares de cada edificación. Una primera modificación del índice de vulnerabilidad básico deberá tener en cuenta el periodo de construcción así como otras características constructivas y el cumplimiento de la normativa sismorresistente vigente en esa época. Modificaciones adicionales se basan en las características geométricas y de posición propias de cada edificio. Por lo tanto, el índice de vulnerabilidad final \bar{V}_I más probable de cada edificio concreto se calcula según la relación (Lantada, 2007; Lantada et al 2010):

$$\bar{V}_I = V_I^* + \Delta M_R + \sum_{i=1}^n \Delta M_{C_i} \quad (1)$$

En la expresión (1) ΔM_R representa los modificadores regionales y ΔM_{C_i} se refiere a los modificadores por comportamiento. El modificador regional ΔM_R se introduce para tomar en cuenta la calidad particular de la construcción del edificio a un nivel regional. El modificador de comportamiento ΔM_{C_i} se asigna sobre las bases de las características específicas de cada edificio, y considera los efectos debidos a diferentes modificadores de comportamiento (Tabla 1): número de pisos, estado de conservación (mantenimiento), morfología del suelo, piso blando, irregularidad de la estructura, cimentación y posición en el conjunto de edificios.

A diferencia del Método Italiano (Benedetti y Petrini, 1984; y Angeletti et al., 1988), el índice \bar{V}_I del MIV define la pertenencia de un determinado edificio a una clase específica de vulnerabilidad de la EMS-98 (Figura 3).

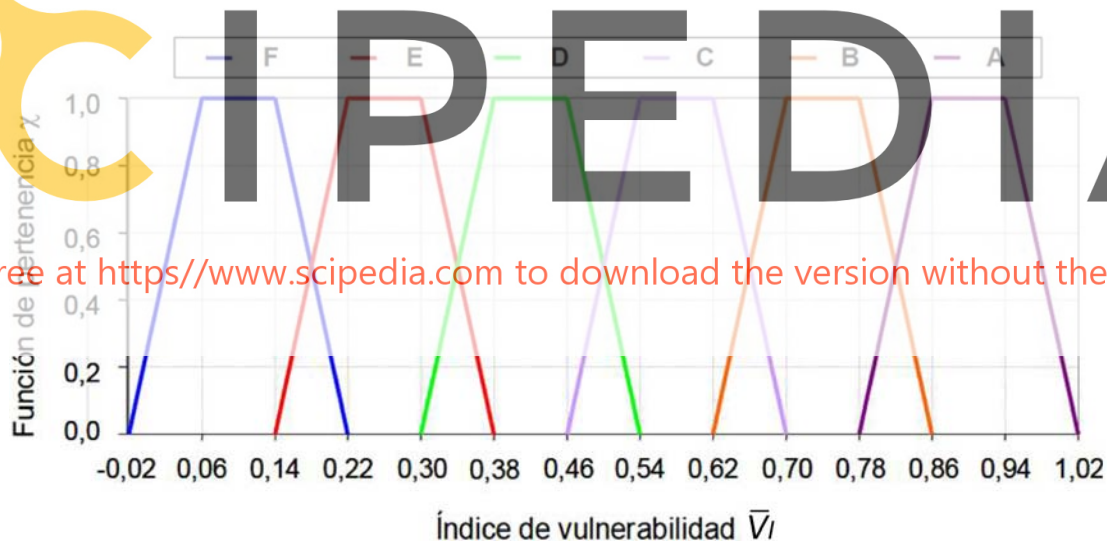


Figura 3. Funciones de pertenencia de un edificio a las clases de vulnerabilidad de la EMS-98 en función de los valores del índice de vulnerabilidad total I_v (Lagomarsino et al, 2003).

Tabla 1. Valores de los factores modificadores por comportamiento para edificios de mampostería (arriba) y de pórticos de RC (abajo).

Edificios de mampostería		
Factores de comportamiento	Parámetros	Valores
Estado de conservación ΔM_{C1}	Buen mantenimiento	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04
Altura o número de pisos ΔM_{C2}	Bajo (1 o 2)	-0.02
	Mediano (3, 4 o 5)	+0.02
	Alto (6 o más)	+0.06

Irregularidad en altura ΔM_{C3}	...	+0.02
Pisos superpuestos ΔM_{C4}	...	+0.04
Tejado ΔM_{C5}	Peso del tejado y acometida del tejado, conexiones con el tejado	+0.04
Intervenciones de reparación ΔM_{C6}	...	-0.08÷+0.08
Edificios en conjuntos: posición ΔM_{C7}	Medio Esquina Frontal	-0.04 +0.04 +0.06
Edificios en conjuntos: elevación ΔM_{C8}	Pisos escalonados Edificios de alturas diferentes	+0.02 -0.04÷+0.04
Morfología del suelo ΔM_{C9}	Pendiente Acantilado	+0.02 +0.04

Edificios de concreto reforzado				
Factores de comportamiento		Valores según el nivel de diseño sismorresistente		
		Pre o código de bajo nivel	Código de nivel medio	Código de alto nivel
Nivel de código		+0.16	0	-0.16
Mal mantenimiento		+0.04	+0.02	0
Número de pisos	Bajo (1 o 2)	+0.04	-0.04	-0.04
	Medio (3, 4 o 5)	0	0	0
	Alto (6 o más)	+0.08	+0.06	+0.04
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02	0
	Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad vertical		+0.04	+0.02	0
Columna corta Ventanas en arco		+0.02	+0.01	0
		+0.04	+0.02	0
Edificios en conjuntos (con juntas antisísmicas insuficientes)		+0.04	0	0
Cimientos	Zapatas corridas	+0.04	0	0
	Zapatas corridas ligadas	0	0	0
	Zapata aislada	0.04	0	0
Morfología del suelo	Pendiente	+0.02	+0.02	-0.02
	Acantilado	+0.04	+0.04	-0.04

En la Figura 3 aparecen las funciones de pertenencia χ en función del índice de vulnerabilidad. Cada función de pertenencia define la afiliación de cada valor individual a una categoría determinada. Esto es, para $\chi = 1$, la pertenencia es segura o plausible, para $0 < \chi < 1$ el valor del parámetro es raro pero posible, y para $\chi = 0$, el parámetro no pertenece al conjunto. De esta forma, los valores del índice de vulnerabilidad \bar{V}_I representan una clasificación que permite cuantificar el comportamiento sísmico del edificio, donde 0 corresponde a edificios de máxima sismorresistencia y 1 a edificios de máxima vulnerabilidad.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

EMS-98 (MEMS)

Tras el reconocimiento de las tipologías constructivas de cada edificio, se clasificó inicialmente su vulnerabilidad según la escala EMS. A cada edificación se le asignó la clase de vulnerabilidad EMS más probable correspondiente a

su tipología y luego teniendo en cuenta la existencia de características sismorresistentes del edificio superiores o inferiores a la media de esa tipología se le consideró de una clase de menor o mayor vulnerabilidad, respectivamente.

Las tipologías más abundantes encontradas en el Centro Histórico son las de mampostería (349, 87.5%) seguidas de las estructuras de marcos de concreto reforzado (RC) (45, 11.3%). Las estructuras de acero y las de madera son muy escasas: 4 y 1 respectivamente. Las de mampostería son estructuras (sin reforzar ni confinar) de fábrica de ladrillo, de bloques de concreto o de adobe (69.7 %, 4.5 % y 2.3 % del total, respectivamente) que generalmente (97.0 % de ellas) tienen diafragmas flexibles (techos de madera con teja, o de láminas de zinc) y las restantes tienen diafragmas rígidos de RC. La mayoría (88.9%) de las estructuras de marcos de RC son de bajo nivel de diseño sísmico y con muros de cerramiento no estructurales. Solo un 8.8% de las estructuras de RC tienen muros de corte y un 2.2 % son de pórticos resistentes a momento. Las estructuras de acero son recientes y con diseño sísmico. La estructura de madera encontrada es antigua, con un diseño y conservación malos.

En la Tabla 2 se muestra la matriz de tipologías estructurales de los edificios censados en este trabajo y su clase de vulnerabilidad EMS asignada aplicando MEMS. Para hacer una correspondencia práctica entre los valores de V_I^* y las clases de vulnerabilidad de la EMS hemos acotado los valores considerados como probables, que aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de tipología estructural, clase de vulnerabilidad EMS asignada y valores más probables del índice de vulnerabilidad de Risk-UE para esas clases.

Tipología estructural	Número de edificios	Vulnerabilidad EMS					
		A	B	C	D	E	F
		Índice V_I^* más probable					
		$V_I^* > 0.82$	$0.66 < V_I^* \leq 0.82$	$0.50 < V_I^* \leq 0.66$	$0.34 < V_I^* \leq 0.50$	$0.18 < V_I^* \leq 0.34$	$V_I^* \leq 0.18$
Adobe de barro y techo de teja de barro (tejas)	5	5					
Adobe de barro y techo de lámina de zinc	4	4					
Ladrillo y techo de teja	138	16	122				
Ladrillo y techo de lámina de zinc	125	11	114				
Ladrillo y techo de lámina de asbesto	5		5				
Ladrillo y techo de madera	1		1				
Bloque de concreto y techo de lámina de zinc	53		53				
Ladrillo y techo de losa maciza de RC	9			9			
Bloque de concreto y techo de losa maciza de RC	9			9			
Concreto reforzado	45			20	16	9	
Acero estructural	4					4	
Madera y techo de teja de barro	1		1				
	399	36	296	38	16	13	

Los resultados de MEMS (Tabla 2) indican que la mayoría de las edificaciones (83.2%) son de vulnerabilidad alta: clases A y B. Las edificaciones con vulnerabilidad A, muy alta, (9 %) son todas las de muros de adobe (material de alta fragilidad) y también muchas de ladrillo y alguna de bloques de concreto, por su antigüedad (>35 años), presentar daños por eventos sísmicos pasados o por degradación del material de construcción. Las edificaciones con vulnerabilidad B son las predominantes (74.2 %) en la zona de estudio, en su gran mayoría estructuras de muros de ladrillo y otras de bloques de concreto, sin diafragmas rígidos pero en buenas condiciones de conservación.

Solo el 9.5 % de las edificaciones inspeccionadas son de clase C, la mitad de ellas son de estructuras de muros portantes (de ladrillo o de bloques de concreto) en buenas condiciones y con pisos rígidos de RC y la otra mitad son edificaciones de marcos de RC de menos de 35 años pero sin diseño antisísmico, que más bien son estructuras murarias confinadas.

Las de clase D (4 % del total) son estructuras de RC con menos de 15 años, buena calidad de construcción y buen nivel de diseño sismorresistente. Las edificaciones de concreto reforzado con alto nivel de diseño y las de acero, bien construidas y que han mostrado buen comportamiento ante eventos sísmicos (3.3 % del total), se consideraron inicialmente (de acuerdo con la escala EMS) de clase E.

RISK-UE (MIV)

Posteriormente, se clasificaron las tipologías de las edificaciones de las 22 manzanas estudiadas, estableciendo una correspondencia entre las estructuras analizadas con las tipologías consideradas en la matriz de estructuras de edificios (BTM) de Risk-UE. Entre las edificaciones murarias: las 9 de adobe se equipararon a la tipología M2, 322 de muros de fábrica de ladrillo o de bloques con diafragmas flexibles a la M3.1 y las 18 con diafragmas rígidos a la M3.4. Entre las de pórticos de RC tenemos 1 resistente a momentos flexionantes del tipo RC1, 23 estructuras regulares de RC con muros de relleno de mampostería no reforzada del tipo RC3.1 y 21 de RC que son irregulares del tipo RC 3.2. Entre las estructuras de acero estructural 1 es resistente a momentos tipo S1, 2 que tienen paredes de mampostería tipo S3 y 1 de estructura mixta, de acero y concreto reforzado del tipo S5.

En la Tabla 3 se muestran las tipologías equiparables a las de Risk-UE, donde también se ha indicado el índice de vulnerabilidad básico V_I^* o tipológico correspondiente de cada una de ellas. También se muestra la clase EMS que le correspondería a ese índice de vulnerabilidad tipológico.

Tabla 3. Tipologías RISK-UE encontradas en cada manzana junto con los índices de vulnerabilidad tipológicos de cada una de ellas y la clase de vulnerabilidad EMS que correspondería a esa tipología.

Manzana	Número de edificios	Tipología RISK-UE									
		M2	M3.1	M3.4	RC1	RC3.1	RC3.2	S1	S3	S5	W
	V_I^*	0.84	0.74	0.62	0.44	0.40	0.52	0.36	0.48	0.40	0.45
	Clase EMS	A	B	C	D	D	C	D	D	D	D
1	14		14								
2	6		6								
3	41		41								
4	23		23								
5	22		22								
6	24		22		1						1
7	7		7								
8	11		11								
9	16		16								
10	27		27								
11	12		12								
12	24		24								
13	13		5	1			7				
14	25		15	1		4	4		1		

15	21	8	11				2				
16	17	1	5	7		2	2				
17	14		9	5							
18	18		5			7	4	1	1		
19	21		10	2		7	1			1	
20	16		10	2		3	1				
21	18		18								
22	9		9								
Total	399	9	322	18	1	23	21	1	2	1	1

Dada la importancia que tienen los factores modificadores, para obtener la vulnerabilidad final de cada edificio se aplicó la fórmula 1, sumando al valor del índice característico (V_I^* , indicados en la Tabla 3) los valores de los índices modificadores regional (ΔM_R) y de comportamiento ($\sum_{i=1}^n \Delta M_{C_i}$). En las Tablas 4 y 5 se muestran, a modo de ejemplo, los valores determinados de los edificios de las manzanas 5 y 19.

Tabla 4. Índices de vulnerabilidad de los edificios de la manzana 5 y la clase EMS correspondiente.

Edificio		Método RISK-UE				Clase de vuln. EMS correspondiente
Ubicación	Tipología	V_I^*	ΔM_R	$\sum_{i=1}^n \Delta M_{C_i}$	\bar{I}_V	
1	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
2	M3.1	0.74	0.009	+0.10	0.849	A
3	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
4	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
5	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
6	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
7	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
8	M3.1	0.74	+0.073	+0.10	0.913	A
9	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
10	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
11	M3.1	0.74	+0.073	+0.08	0.893	A
12	M3.1	0.74	0.009	+0.14	0.889	A
13	M3.1	0.74	0.009	-0.08	0.669	B
14	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
15	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
16	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
17	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
18	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
19	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
20	M3.1	0.74	0.009	+0.02	0.769	B
21	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B
22	M3.1	0.74	0.009	-0.06	0.689	B

Tabla 5. Aplicación del método RISK-UE a las viviendas de la manzana 19.

Edificio		Método RISK-UE				Clase de vuln. EMS correspondiente
Ubicación	Tipología	V_I^*	ΔM_R	$\sum_{i=1}^n \Delta M_{C_i}$	\bar{I}_V	
1	RC3.2	0.522	-0.022	0.000	0.5	D
2	RC3.1	0.402	0	-0.060	0.342	D
3	M3.1	0.74	-0.053	0.080	0.767	B
4	RC3.1	0.402	0	-0.060	0.342	D
5	RC3.1	0.402	0	0.040	0.442	D
6	RC3.1	0.402	0	0.100	0.502	C
7	RC3.1	0.402	0	-0.100	0.302	E
8	M3.1	0.74	0.009	-0.140	0.609	C
9	M3.4	0.616	0	-0.080	0.536	C
10	RC3.1	0.402	0	-0.020	0.382	D
11	RC3.1	0.402	0	0.000	0.402	D
12	M3.1	0.74	-0.053	0.160	0.847	A
13	M3.1	0.74	-0.053	0.020	0.707	B
14	M3.1	0.74	-0.053	0.060	0.747	B
15	S5	0.402	0	0.000	0.402	D
16	M3.1	0.74	0.009	-0.080	0.669	B
17	M3.1	0.74	0.009	0.060	0.809	B
18	M3.1	0.74	-0.053	-0.080	0.607	C
19	M3.4	0.616	0.134	0.160	0.91	A
20	M3.1	0.74	-0.053	0.000	0.687	B
21	M3.1	0.74	0.135	0.140	1.015	A

Los resultados de vulnerabilidad final (Tabla 6) muestran que en la zona estudiada predominan las edificaciones con clases de vulnerabilidad B y A (alta y muy alta), habiendo crecido el número de construcciones calificadas como clase A (de 36 a 44) y disminuido las de clase E (de 13 a 5) respecto a la evaluación con MEMS. La variación encontrada en cada manzana indica la mejora que implica utilizar MIV y lo conveniente que es realizar estudios adicionales con este método en el núcleo urbano para proponer estrategias de reducción de la vulnerabilidad de estas edificaciones.

Con los resultados obtenidos se elaboraron mapas de detalle de vulnerabilidad sísmica de cada una de las manzanas estudiadas, mapas que constituyen una herramienta muy útil para detectar a simple vista cuáles son los edificios más vulnerables en una manzana. En estos mapas se adoptó una convención gradual de colores clásica en análisis de riesgos de verde a rojo para indicar las construcciones de menor a mayor vulnerabilidad, respectivamente. En las Figuras 4 y 5 se muestran dos ejemplos de distribución de la vulnerabilidad dentro de las manzanas 5 y 19, estimada con el método MIV.

En la Tabla 6 se presentan los edificios clasificados según su índice de vulnerabilidad total para cada una de las 22 manzanas y expresados como clases EMS finales. Estos resultados indican cómo ha variado la clasificación final respecto a la que tenían según la matriz de tipologías (Tabla 5) y también con respecto a la clasificación tipológica aplicando MEMS.



Figura 4. Índices de vulnerabilidad de los edificios de la manzana 5 y su clase EMS correspondiente.

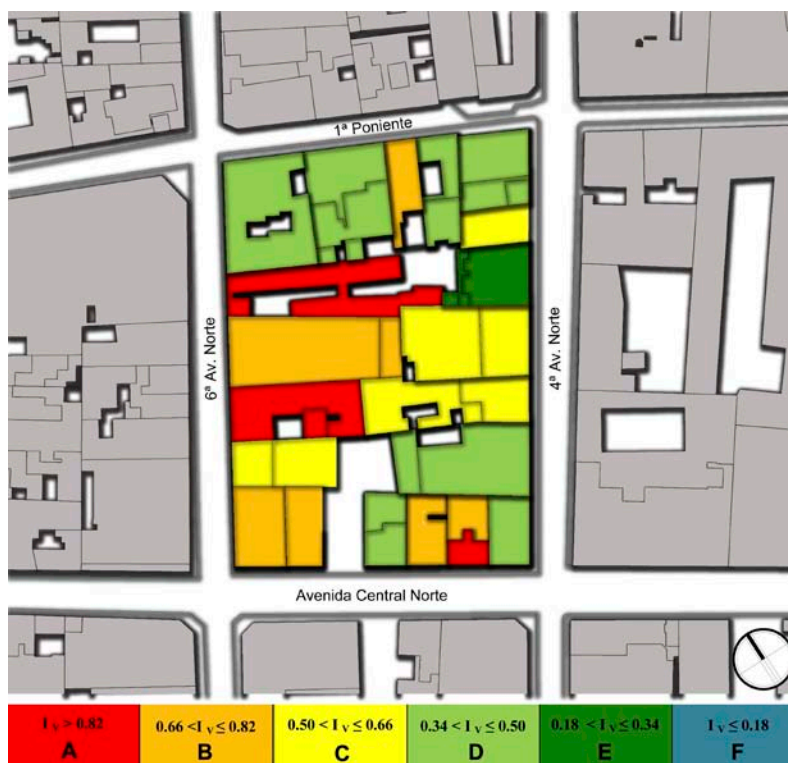


Figura 5. Índices de vulnerabilidad de los edificios de la manzana 19 y su clase EMS correspondiente.

Tabla 6. Clasificación final, según su índice total, de la vulnerabilidad de los edificios de las 22 manzanas.

Manzana	Número de edificios	Vulnerabilidad EMS según el índice total calculado					
		A $\bar{V}_I > 0.82$	B $0.66 < \bar{V}_I \leq 0.82$	C $0.50 < \bar{V}_I \leq 0.66$	D $0.34 < \bar{V}_I \leq 0.50$	E $0.18 < \bar{V}_I \leq 0.34$	F $\bar{V}_I \leq 0.18$
1	14	3	11				
2	6		6				
3	41		41				
4	23	3	20				
5	22	4	18				
6	24		22	2			
7	7		7				
8	11		11				
9	16	1	15				
10	27	3	24				
11	12	1	11				
12	24	1	23				
13	13	1	5	3	3	1	
14	25	4	11	2	8		
15	21	4	16	1			
16	17	3	9	2	2	1	
17	14	2	8	4			
18	18	1	4	4	7	2	
19	21	3	6	4	7	1	
20	16	3	8	1	4		
21	18	3	11	4			
22	9	4	3	2			
Total	399	44	290	29	31	5	0

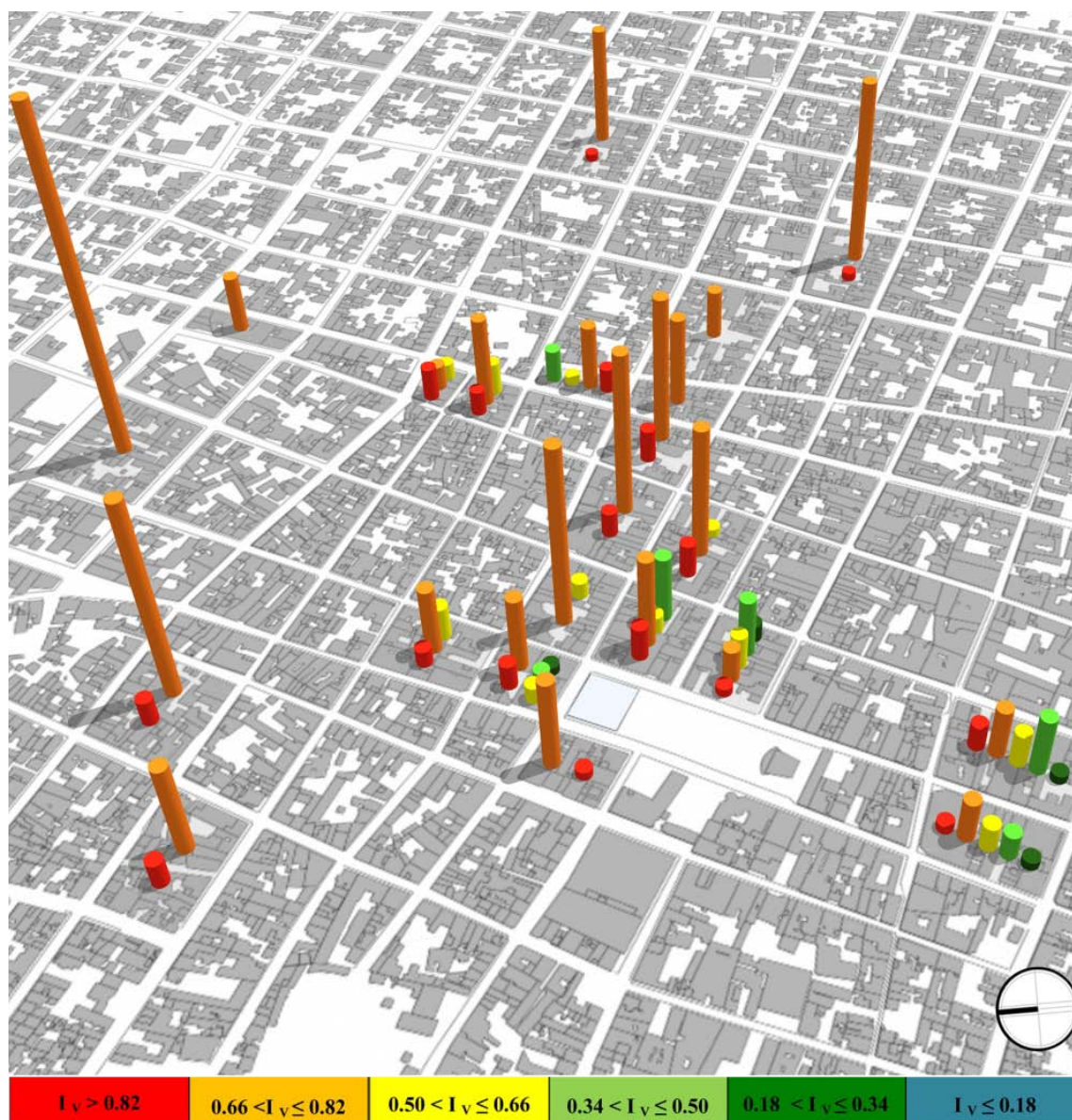


Figura 6. Distribución de la vulnerabilidad EMS de los edificios (según sus índices de vulnerabilidad) de las 22 manzanas estudiadas. Obsérvese que las construcciones de clase B son las predominantes seguidas de las de tipo A, siendo menos abundantes las de clases C y D y muy escasas las de clase E.

CONCLUSIONES

La inspección in situ de 399 construcciones del Centro Histórico de Tapachula, Chiapas, indica que el sistema estructural predominante (87.5 %) es el de muros de carga (de adobe, ladrillo o bloques), por lo general (el 93.4 %) con diafragmas flexibles y que solo el 6.6% tiene diafragmas rígidos de RC. Las estructuras de marcos de concreto reforzado son el 11.3 %, la mayoría de ellas (88.9%) de bajo nivel de diseño sísmico y con muros de cerramiento no estructurales, solo un 8.8% de las estructuras de RC tienen muros de corte y un 2.2 % son de pórticos resistentes a momento. El 1 % de edificios son estructuras de acero recientes y se ha encontrado solo una vivienda de madera, antigua y con un diseño y conservación malos.

Se encontró que al 93% de las edificaciones no se le realizan acciones de mantenimiento, gran parte de ellas (81%) presenta algún grado de deterioro por presencia de humedades, filtraciones y fisuras, y un 5% tiene un alto grado de deterioro por este concepto, siendo solo un 14% las que no presentan este tipo en sus paredes o muros.

Una primera estimación de la vulnerabilidad sísmica de la zona estudiada utilizando la identificación tipológica y criterios de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) indica que la mayoría de las edificaciones tienen una vulnerabilidad alta (74.2 % de clase B) y el 9 % muy alta (clase A). El 9.5 % su vulnerabilidad es media (clase C), la mitad de estas construcciones son murarias y la otra mitad de marcos de RC sin diseño antisísmico. Las estructuras de RC de buena calidad de construcción (normalmente con menos de 15 años) y buen nivel de diseño sismorresistente se consideraron de clase D y aquellas con alto nivel de diseño junto con las de acero como clase E.

La cuantificación de la vulnerabilidad con un mayor nivel de detalle mediante el método MIV de Risk-UE, sobre todo considerando los factores con una alta influencia en el comportamiento sísmico, ha llevado a detectar un incremento significativo de construcciones de clase A (de 36 a 44) y de clase D (de 16 a 31) y una disminución de las de clase C (de 38 a 29) y E (de 13 a 5) respecto a la evaluación realizada con los criterios de EMS. Estos nuevos resultados indican que la vulnerabilidad encontrada con MIV es algo superior debido a que los factores modificadores considerados, sobre todos los de comportamiento, cuantifican con mayor precisión la variación de la vulnerabilidad de cada edificio. Hemos comprobado que el MIV es un método robusto, sencillo de aplicar y supone una mejora significativa en la evaluación individual de la vulnerabilidad de cada edificio ya que reduce las incertidumbres involucradas en el método EMS.

Los resultados indican que la mitad de las manzanas estudiadas solo tienen construcciones clases A y B, y que las restantes manzanas tienen también una mayoría de edificios de vulnerabilidad alta pero tienen algunas de menor vulnerabilidad, sobre todo donde ha habido construcciones recientes de varias plantas.

Estos resultados de alta vulnerabilidad son un indicador de las condiciones de riesgo sísmico alto existente en el Centro Histórico de la ciudad y ponen de manifiesto la necesidad de realizar un estudio más amplio de la ciudad para realizar un diagnóstico más completo para la prevención, la mitigación y la gestión de emergencias sísmicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración en la toma de datos in situ realizada por estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas y del Instituto Tecnológico de Tapachula.

REFERENCIAS

- Angeletti, P., Bellina, A., Guagenti E., Moretti, A., Petrini, V. (1988). "Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results". *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo, Japan.
- Barbat, A. y Pujades, L. (2004). Metodología de estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones clasificadas de "importancia especial" en la NCSE-02. Informe Técnico N° IT-438, Noviembre 2004. *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*. Barcelona, España.
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione." *L'industria delle Costruzioni* 149: 66-78.
- Benito, B., Molina, E. y Laín L. (2001). Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala, aplicación al diseño sismorresistente, *Reporte de investigación*, Guatemala.
- Benito M.B., Lindholm C., Camacho E., Climent Á., Marroquín G., Molina E., Rojas W., Escobar J. J., Talavera E., Alvarado G. E., Torres Y. (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 102, No. 2, pp. 504–523, April 2012, doi: 10.1785/0120110015
- Cardona O.D., Ordaz M.G., Reinoso E., Yamin L.E., Barbat A.H. (2010) Comprehensive approach for probabilistic RISK assessment (CAPRA): international initiative for disaster RISK management effectiveness. In: 14th European conference on earthquake engineering, Ohrid, Macedonia.

- Comisión Federal de Electricidad – Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*. Comisión Federal de Electricidad, México, D. F., México.
- FEMA (1999) Earthquake loss estimation methodology—earthquake HAZUS99. Service release 2 (SR2) technical manual, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- Figuroa, J. (1973). *Sismicidad en Chiapas*, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.
- Figuroa, J., Lomnitz, C., Dawson, A., Meli, R. y Prince J.. (1975). Los sismos de julio a octubre de 1975, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.
- González-Herrera, R., Mora-Chaparro, J.C., Aguirre-González, J., García- Moreno, L.M., Rueda-Ibarra, J.A., Cárdenas-Sarmiento, R.A., Lovera-Salazar, S.B., Gil-Ríos, A., Jiménez-Franco, A., Paredes-Victorio, V.E., Edén-Tamayo, O.I., Hernández-Arrazate, R., Cruz-Gutiérrez, J.A., Carrasco-Alfaro, C., Velázquez-Hernández, A.M., Molina-Santos, R., López-Lena, D.L., Gómez- Juan, E.A., Flores-Coutiño, R.C., Solís-Escalante, A. y Zavala-De los Santos, C.A. (2012). *Microzonificación sísmica de Tapachula de Córdova y Ordóñez, Chiapas*. Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres, Estado de Chiapas, 131 pp.
- Grünthal, G., (ed.), (1998). "European Macroseismic Scale 1998", *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* Volume 15, Luxembourg.
- Hill M., Rossetto R. (2008) Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe. *Bull. Earthq. Eng.*, 6(2), 335–365.
- INEGI. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Chiapas. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/ResultadosR/CPV/Default.aspx?texto=tapachula>
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. y Resemini, S. (2003). WP05. *Vulnerability assesment of historical and monumental buildings. Handbook. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns*. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. DISEG, University of Genoa, Genoa. 90 pp.
- Lantada Zarzosa, M. N. (2007). *Evaluación de riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Lantada N., Irizarry J., Barbat A.H., Goula X., Roca A., Susagna T., Pujades L.G. (2010) Seismic hazard and RISK scenarios for Barcelona, Spain, using the RISK-UE vulnerability index method. *Bull. Earthq. Eng.* 8(2), 201–229.
- Medvedev S.W., Sponheuer W., Karnik V. (1965). Seismic Intensity Scale (version MSK 1964). *Working Group on Seismicity and Seismo-Tectonics* (First meeting Tbilisi, 8-12 june 1965). Unesco Archives: UNESCO/NS/SEISM/28. Paris, 7 May 1965.
- Milutinovic Z. V., Trendafiloski G. S. (2003). *WP4: Vulnerability of current buildings. RISK-UE project Handbook*. RISK-UE project report, 111 pp.
- MOC-CFE (2008). Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.
- Mora, J.C., González, R., Hernández, M.V., Gil, R.A. y Vázquez, N.E. (2012). Atlas de riesgo Municipio Tapachula. *Reporte interno Secretaría de Desarrollo Social*. 78 pp.

- Pardo, M. y Suárez G., (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implication: *J. Geophysical Research*, **100**, 12357-12373.
- Preciado, A. (2007). "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos en el estado de Colima, México." Tesis de Maestría, Universidad de Colima, México
- Preciado, A. y Orduña, A. (2008). Seismic vulnerability assessment of historical constructions in Colima, Mexico: A correlation between damage and intensity. Universidad de Colima, México.
- Preciado, A., Rodríguez O., Caro J.L. y Lujan R. (2015). Vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería no reforzada en el pueblo de Tlajomulco, Jalisco. Proc. XX Cong. Nac. de Ingeniería Sísmica, 15 pp.
- Ramírez de Alba, H., Pichardo Lewenstein, B., Arzate Cruz, A. P. (2007). Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en zonas urbanas. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-1, pp.13-23, ISSN: 1665-529X.
- Richter, C.F., (1958). "Modified Mercalli Intensity Scale" (MM-56). Elementary Seismology. W.H. Freeman and Company, San Francisco, pp. 135-149; 650-653.
- Salgado R. A., (2005), Daños por sismos esperados en las viviendas tradicionales de ciertos Centros Históricos del sureste mexicano. En "Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica", Artículo II-04, México D.F.
- Sánchez Tizapa, S., Arroyo Matus, R., Mebarki, A., Valencia, N., Morales Galeana, J. A. (2013). Seismic vulnerability assesment of existing masonry apartment buildings in Acapulco City (Mexico). 12th Canadian Masonry Symposium. Vancouver, British Columbia, June 2-5, 2013.
- Suárez, G. y Singh, K. (1986). Tectonic interpretation of the Trans Mexican Volcanic Belt Discussion: *Tectonophys*, **127**, 155-160.
- Tejeda Jacome J. C., Licea Panduro R., Araiza Garaygordobil J. C. (2004) Evaluación del comportamiento estructural de la vivienda económica, en la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, durante el sismo de enero del 2003. En "Memoria del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural", Artículo V-04, Acapulco, Guerrero.
- Vega D. y Lermo J., (2005) Estimación de efecto de sitio y la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Acatlán, Puebla. En "Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica", Artículo II-26, México, D.F.